

CÓDIGO 2.3.24**ESTUDIO DE PÓRTICOS METÁLICOS INDUSTRIALES FRENTE AL FUEGO,
MEDIANTE EL USO COMBINADO DE ACEROS****García, Harkaitz¹, Biezma, María Victoria², Cuadrado, Jesús³**

1: Departamento de mecánica
Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
harkaitzgarcia@gmail.com

2: Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales
Universidad de Cantabria
maria.biezma@unican.es

3: Departamento de mecánica
Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
jesus.cuadrado@ehu.es

PALABRAS CLAVE: Aceros FR, Estructura metálica, Pinturas intumescentes, Resistencia al fuego.

RESUMEN

En este artículo se ha planteado la utilización de las estructuras metálicas vistas en diferentes tiempos de exposición al fuego. Para ello se ha utilizado de manera combinada un acero al carbono convencional (S275), con un acero micro aleado (FR) con mejores prestaciones a altas temperaturas. Con objeto de mejorar el comportamiento del conjunto también se ha planteado el uso de una protección mediante pintura intumescente.

El presente estudio analiza 462 casos diferentes, todos ellos son pórticos de 35 metros de luz, en los cuales se ha estudiado su comportamiento para diferentes tiempos de exposición frente al fuego (0... 90 minutos). Otra de las variables que se ha considerado es la protección pasiva frente al fuego, que se ha resuelto mediante la aplicación de otra serie de espesores de pintura intumescente (0... 1800 micras). La última variable tenida en cuenta en el estudio está relacionada con el precio de los materiales a utilizar. Esto es debido a que la producción de estos materiales de elevadas prestaciones, no son fáciles de conseguir en el mercado debido a su elevado coste y por ello, se ha tratado de establecer su valor con relación al coste del acero S275, más utilizado en edificación. Esto se ha realizado a través de una serie de coeficientes de mayoración del precio del acero FR frente al acero S275 (1.00... 1.50).

El objetivo es demostrar que existen casos donde es más rentable el combinar los dos aceros y razonar la posición de cada acero dentro de los pórticos.

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se ha planteado defender el uso de las estructuras metálicas vistas en diferentes tiempos de exposición al fuego, para ello por un lado se ha utilizado de manera combinada un acero al carbono convencional (S275) con un acero micro aleado (FR) [1] [2] que ha sido desarrollado en los últimos años con propiedades físicas, mecánicas y químicas cuyos valores se mantienen a elevadas temperaturas, como sucede en los casos de incendio (Tabla 1). El principal inconveniente para la utilización de este acero FR es su elevado coste.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los aceros S275 y FR.

	20°C		500°C		600°C		800°C	
	S275	FR	S275	FR	S275	FR	S275	FR
f_y (N/mm²)	275	275	215	275	129	256	30	50
E (N/mm²)	210000	210000	126000	97860	65100	77910	0	16800

Por otro lado con las pinturas intumescentes se puede conseguir mayores tiempos de protección de las estructuras [3] [4], pero la principal limitación es que, para conseguir estos tiempos, habría que aplicar bastantes capas de esta pintura, lo cual supone aumentar mucho el coste total de la estructura.

El objetivo ha sido el buscar una ley que defina la posición del cambio del tipo de acero en cada barra, de manera que el coste total del pórtico sea el más económico posible. La posición de este cambio dependía de una serie de variables como son: el tiempo de exposición al fuego (0min, 20min, 30min, 45min, 60min y 90min), el coste del acero al carbono convencional, el coste del acero micro aleado (el del convencional multiplicado por 1, 1.05, 1.1, 1.15, 1.20, 1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45 y 1.5 €/Kg) y el coste de las imprimaciones de pintura intumescente con los siguientes espesores 0, 300, 600, 900, 1200, 1500 y 1800 micras.

Se ha planteado el uso de un acero micro aleado, para las partes de la estructura más solicitadas que se ajuste mejor a los requerimientos exigidos y conseguir una solución adecuada desde el punto de vista técnico, pero también económico. (Ver Figura 1)

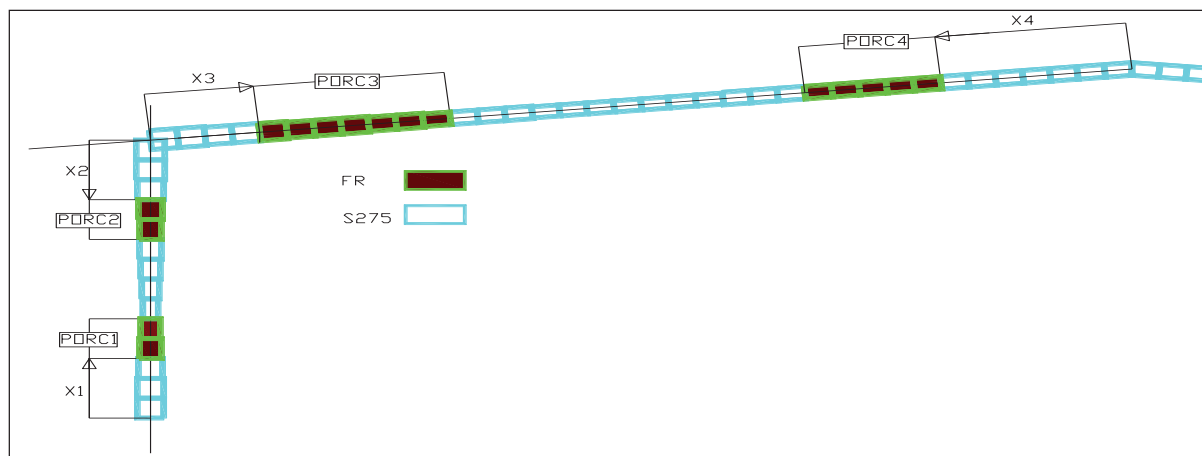


Figura 1: Variables

Para el desarrollo de los cálculos planteados se ha utilizado la formulación propuesta por el Código Técnico [5], la EAE [6] y los Eurocódigos [7], esta formulación implica la aceptación de que la temperatura

de los gases sigue la curva nominal definida en la norma UNE EN 1363:2000 [8]. El dimensionado se ha limitado a la combinación de acciones en situación accidental, dejando fuera de este estudio el resto de combinaciones planteadas en estas normas.

Se han hecho estudios de este tipo como por ejemplo en el artículo “Application of fire-resistant steel to beam-to-column moment connections at elevated temperatures”[9], en el cual se compara una unión viga-pilar empotrada formada por aceros no FR y la misma unión utilizando un acero FR en la zona más solicitada y el acero no FR en el resto. Se concluye que los resultados son más satisfactorios en este segundo caso. También en el artículo “Parametric Studies on fire resistance of fire-resistant steel members” [10] se hace un análisis de un acero FR mediante el programa ANSYS y se llega a la conclusión del mejor rendimiento de estos aceros en casos de elevadas temperaturas. En el artículo “Fire-safe Design of Modern Steel Buildings in Japan” [11] se analizan dos casos reales de edificios diseñados con acero FR en Japón.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Se han contado con diferentes herramientas para el desarrollo del trabajo, para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones en los pórticos se ha utilizado el programa informático Metal 3D de Cype ingenieros [12]. Un aspecto importante era el considerar que para cada tiempo de exposición al fuego que se analizó se modificaba el límite elástico y el módulo de elasticidad de los aceros (que a demás era diferente en cada una de las barras en las que se discretizó el pórtico, como se explica a continuación).

Para cada caso del estudio se discretizó cada barra en tramos de 0,5 metros (en adelante se les llamará unidades). Tras conseguir con el Metal 3D los esfuerzos en cada uno, se procedió a hacer un dimensionamiento de ellos, uno a uno y para cada tipo de acero; a continuación se valoró cada unidad para cada tipo de acero y se escogió el más económico todo este procedimiento de cálculo se ha desarrollado en una serie de hojas Excel, donde se han ido introduciendo los datos obtenidos del programa de cálculo en cada uno de los casos. Una vez dimensionado todo el pórtico se calcularon los nuevos esfuerzos con el Metal 3D, y se repitió todo el proceso hasta llegar a las dimensiones definitivas. En la figura 2 se presenta un diagrama de bloques indicando todo este proceso.

En cuanto a los materiales utilizados en cada pórtico, el Acero FR utilizado es el FR275N de ThyssenKrupp [13] y la marca de pintura utilizada ha sido STOFIRE de Euroquímica [14]. Los datos asociados al recubrimiento intumescente entre 500°C y 700°C, se han obtenido mediante interpolación de los datos suministrados.

Por último y antes de comenzar con el proceso indicado en la figura 2, cogiendo los gráficos que nos relacionan la temperatura del acero con el límite elástico y el módulo de elasticidad de cada acero (Figura 3), se ha conseguido el Límite Elástico y el Módulo de Elasticidad de cada tipo de perfil para cada tiempo de exposición con cada espesor de pintura.

Cabe mencionar el artículo “A comparison of the mechanical properties of fire-resistant and S275 structural steels” [15], en el que ya se analiza la posibilidad de utilización de los aceros FR en situaciones de elevadas temperaturas.

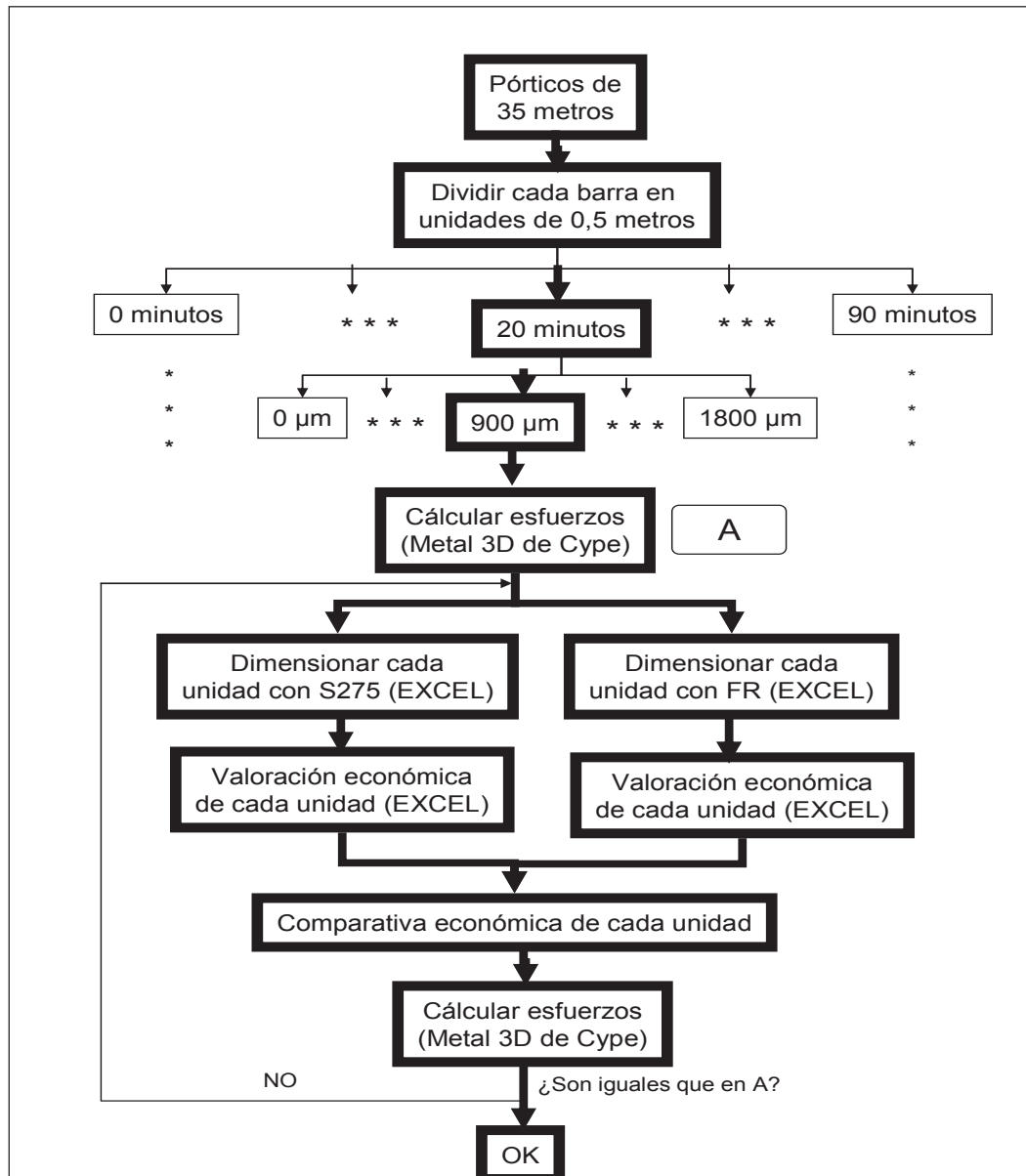


Figura 2: Metodología.

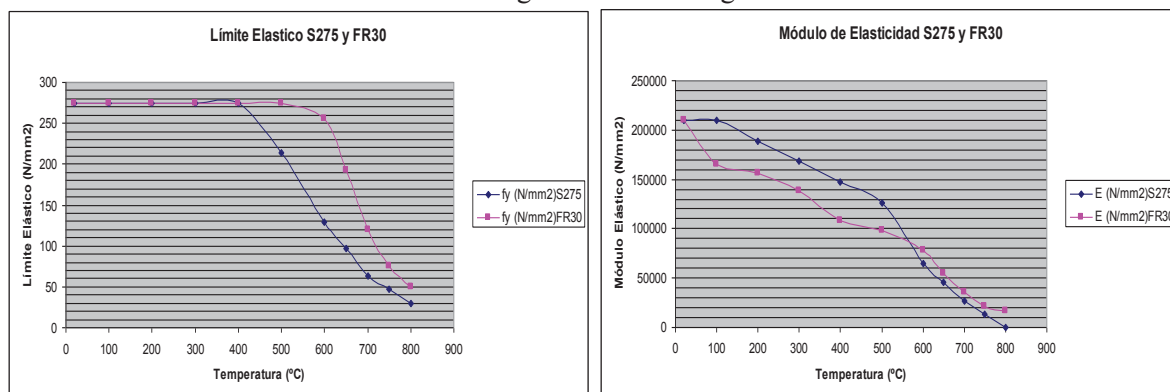


Figura 3: Límite Elástico y Módulo de Elasticidad de los Aceros FR y S275

En la Figura 3 se puede observar como el Límite Elástico del Acero FR mantiene mejor su valor a partir de los 400°C aproximadamente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

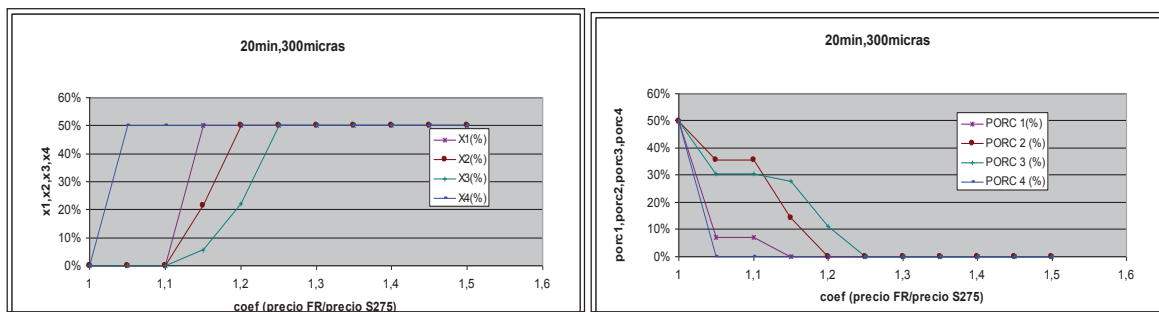
En la Tabla 2 se representan, todos los casos de los pórticos dimensionados, cada celda supone el dimensionamiento de un pórtico completo para unos valores concretos de las variables mencionadas anteriormente (tiempo, espesor de pintura, precio FR).

Tabla 2: Tabla general de todos los casos.

	tiempo(min)	espesor pintura (micras)	0 min						20 min						30 min								
			0	300	600	900	1200	1500	1800	0	300	600	900	1200	1500	1800	0	300	600	900	1200	1500	1800
PrecFR/Prec3275	1																						
	1,05																						
	1,1									1932	2027							2182	2064	2404			
	1,15									1981	2027							2267	2102	2404			
	1,2									2040	2027							2352	2140	2404			
	1,25									2043	2027							2436	2169	2404			
	1,3									2038								2521	2178	2404			
	1,35									2038								2606	2178				
	1,4									2038								2691	2178				
	1,45									2038								2776	2178				
1,5									2038								2861	2178					
																	2946	2178					

- Casos en los que el dimensionado óptimo pide que todas las unidades del pórtico sean de acero al carbono convencional (S275). En estos casos las variables del estudio quedan así: X1= 50%, X2= 50%, X3= 50%, X4= 50%, PORC1= 0%, PORC2= 0%, PORC3= 0% y PORC4= 0%.
- Casos en los que el dimensionamiento óptimo pide que todas las unidades del pórtico sean de acero FR. En estos casos las variables del estudio quedan así: X1= 0%, X2= 0%, X3= 0%, X4= 0%, PORC1= 50%, PORC2= 50%, PORC3= 50% y PORC4= 50%.
- Casos en los que el dimensionamiento óptimo pide que las unidades del pórtico sean de una combinación de los dos aceros de estudio en el artículo (S275 y el acero FR). En estos casos las variables del estudio no tienen un valor constante, cada caso es diferente.

En las gráficas de las Figura 4, 5, 6 y 7 se han dejado como constantes tanto el tiempo como el espesor de pintura y variables tanto la relación precio FR/S275 como X1...PORC8. Estas gráficas son las correspondientes a los casos de 20 minutos y 300 µm y 45 minutos y 1200 µm.

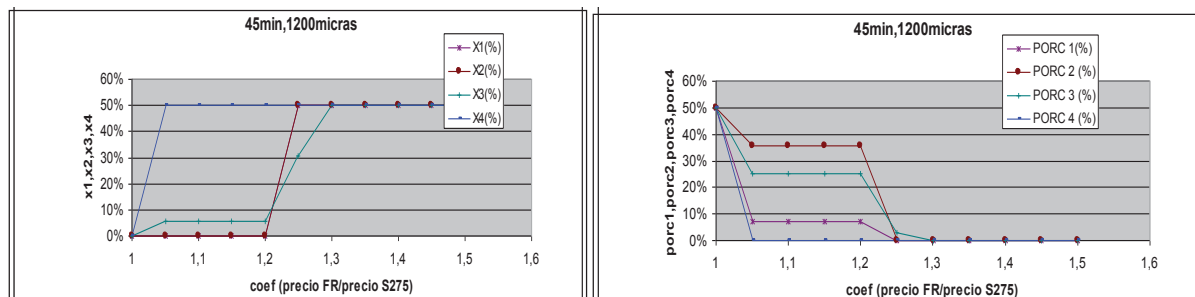


Figuras 4 y 5: Gráficas caso 20 minutos y 300µm.

En el caso de 20 minutos de exposición al fuego con 300 μm de protección de pintura intumescente, las variables “X1, X2, X3” inician su ascenso de 0% a 50% en la relación precioFR/precioS275 1,1. La rapidez del ascenso hasta el 50% es de la siguiente manera, $X1 > X2 > X3$. La variable “X4” excepto para el mismo valor de los aceros, es decir, precioFR/precioS275 = 1, siempre es 50%. Esto quiere decir que desde la mitad de la viga de cubierta hasta la cumbrera será más económico hacerlo con acero S275.

Los valores de “PORC1” y “PORC2” son muy pequeños comparando con los valores de “PORC3” y “PORC4”, esto es debido a que la necesidad de los aceroFR es mayor cerca del nudo pilar-viga y no tanto cerca de la cimentación ni cerca de la cumbrera.

La forma de la curva de bajada de las variables “PORC” desde 50% a 0% se mantiene casi constante hasta cierta relación precioFR/precioS275 y luego con una pendiente parecida desciende hasta el 0%.



Figuras 6 y 7: Gráficas caso 45 minutos y 1200 μm .

En el caso de 45 minutos de exposición al fuego con 1200 μm de protección de pintura intumescente, las variables “X1, X2, X3” inician su ascenso de 0% a 50% en la relación precioFR/precioS275 1,2. La rapidez del ascenso hasta el 50% es de la siguiente manera, $X1 = X2 > X3$. Con la variable “X4” sucede lo mismo que en el caso anterior.

Con las variables “PORC” sucede igual que en el caso anterior, con la única diferencia que el descenso al 0% sucede para relaciones precioFR/precioS275 mayores. Esto es debido a que en este caso la necesidad de los aceros FR es más importante que en el caso anterior.

Se ha hecho un análisis similar en todas las columnas donde existen celdas de color , a continuación se comenta este análisis:

Si se analiza la variable “X1” el paso de 0% a 50% sucede con un incremento de la relación precioFR/precioS275 de 5, 10 o 15 décimas y siempre entre el rango de valores de precioFR/precioS275 (1,1 y 1,25).

Si se analiza la variable “X2” el paso de 0% a 50% sucede con un incremento de la relación precioFR/precioS275 de 5, 10 o 15 décimas y siempre entre el rango de valores de precioFR/precioS275 (1,1 y 1,3).

Si se analiza la variable “X3” el paso de 0% a 50% sucede con un incremento de la relación precioFR/precioS275 de 15 o 30 décimas y siempre entre el rango de valores de precioFR/precioS275 (1 y 1,35).

Si se analiza la variable “X4” el paso de 0% a 50% sucede con un incremento de la relación precioFR/precioS275 de 5, 20 o 25 décimas y siempre entre el rango de valores de precioFR/precioS275 (1 y 1,25).

Si se analiza la variable “PORC1” menos en dos casos (“45min, 600 μm ” y “60min, 1500 μm ”) en el resto el porcentaje de aceroFR es menor al 10% de la barra (es decir, muy pequeño) y en estas dos excepciones no pasa del 30%. (Siempre exceptuando los casos donde la relación $\text{precioFR}/\text{precioS275}=1$, donde siempre es 50%). El paso hasta el 0% sucede entre el rango de valores de $\text{precioFR}/\text{precioS275}$ (1 y 1,3).

Si se analiza la variable “PORC2” se mantiene siempre por debajo del 40% (siempre exceptuando los casos donde la relación $\text{precioFR}/\text{precioS275}=1$, donde siempre es 50%). El paso hasta el 0% sucede entre el rango de valores de $\text{precioFR}/\text{precioS275}$ (1 y 1,3).

Si se analiza la variable “PORC3” se mantiene siempre por debajo del 35% (siempre exceptuando los casos donde la relación $\text{precioFR}/\text{precioS275}=1$, donde siempre es 50%). El paso hasta el 0% sucede entre el rango de valores de $\text{precioFR}/\text{precioS275}$ (1 y 1,35).

Si se analiza la variable “PORC4” se mantiene siempre por debajo del 25% (siempre exceptuando los casos donde la relación $\text{precioFR}/\text{precioS275}=1$, donde siempre es 50%). El paso hasta el 0% sucede entre el rango de valores de $\text{precioFR}/\text{precioS275}$ (1 y 1,25).

Como se puede observar en las gráficas en las variables “PORC”, la forma de la curva de bajada desde 50% a 0% es siempre parecida. El porcentaje se mantiene casi constante hasta cierta relación $\text{precioFR}/\text{precioS275}$ y luego con un pequeño aumento de esta relación el porcentaje desciende hasta el 0%.

Analizando la influencia del tiempo de exposición al fuego, cabe mencionar que las variables “X” tienden a 0 % cuando este tiempo aumenta y el paso de 50% a 0% sucede para tiempos de exposición mayores cuanto más aumenta la relación $\text{precioFR}/\text{precioS275}$. La variable “X3” es en la que más lentamente sucede este paso.

En cuanto a las variables “PORC”, cuando el tiempo aumenta tienden al 50% y el paso de 0% a 50% sucede para tiempos de exposición mayores cuanto más aumenta la relación $\text{precioFR}/\text{precioS275}$. La variable “PORC4” es en la que más rápido sucede este paso.

4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que las solicitaciones aumentan a medida que la sección analizada más se aproxima a la base del pilar o al nudo pilar-viga, y a demás se pretende analizar situaciones de incendio donde debido a las altas temperaturas las propiedades físicas del acero convencional serán peores que las del acero micro aleado, a priori según aumenta el tiempo de exposición al fuego las zonas más próximas a la base del pilar y al nudo pilar-viga estarán formadas por los aceros micro aleados. En consecuencia las variables “X” de la Figura 1 tenderán a cero según aumenta el tiempo de exposición.

No obstante en algunos de los pórticos dimensionados y sobre todo en las unidades de las barras próximas al nudo pilar-viga suceden unas configuraciones de aceros en las que no se da este hecho.

En la realidad, sucede que la necesidad de utilizar un perfil con una sección mayor reduce la temperatura de dicho perfil (por su menor masividad) y al estar esta unidad (o unidades) a una temperatura inferior, el Límite Elástico y el Módulo de Elasticidad del acero S275 todavía se mantienen elevados por lo que en algunos casos puede darse la circunstancia de que la unidad (incluso unidades) más próxima al nudo pueda ser de acero S275. En la unidad contigua al ser más pequeña pasa lo contrario y en esta ya si es necesario que sea de acero FR

La principal conclusión de este artículo es que con este estudio se ha verificado que en un porcentaje importante de todos los casos analizados, la utilización de el acero FR combinado con el acero S275 y la pintura intumescente es la posibilidad más rentable (económicamente) y técnicamente válida.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo recibido en esta investigación por parte del Ministerio de Educación y Ciencia mediante el proyecto BIA2010-20789-C04-04 (MIVES IV), así como al Gobierno Vasco a través del Grupo de Investigación IT 781-13.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Muratov, A.N., Morozov, Y.D., Chevskaya, O.N., Filippov, G.A. Technology for The Commercial Production of Fire-Resistant Steel for Building Structures, *Metallurgist*. Vol. 8, (2007).
- [2] Panigrahi, B.K. Microstructures and properties of low-alloy fire resistant steel. *Indian academy of sciences*. Vol 29 (2006).
- [3] Chico, B., López, A., Lobo, M.A., de la Fuente, D., Castaño, J.G., Morcillo, M. & López, F.A. Estudio de la capacidad para intumescer de dos sistemas de pintura expuestos a ambientes internos agresivos. *Revista de Metalurgia*. Vol 41 (2005).
- [4] Duquesne, S., Magnet, S., Jama, C., Delobel, R. Intumescent paints: fire protective coatings for metallic substrates. *Surface and Coatings Technology*. Vol 180-181 (2004).
- [5] Código Técnico de la Edificación (CTE). (2006)
- [6] Instrucción de Acero Estructural (EAE). (2011)
- [7] Eurocódigo 3. (2009)
- [8] UNE EN 1363:2000. Ensayos de Resistencia al fuego.
- [9] Chung, H.Y., Lee, C.H., Su, W.J. Application of Fire-Resistant Steel to Beam-to-Column Moment Connections at Elevated Temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol 66/2 (2010).
- [10] Ding, J., Li, G.Q., Sakumoto, Y. Parametric Studies on Fire Resistance of Fire-Resistant Steel Members. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol 60/7 (2004).
- [11] Sakumoto, Y.U., Saito, H. Fire-Safe Design of Modern Steel Buildings in Japan. *Journal of Constructional steel Research*. Vol 33/2 (1995).
- [12] Programa Metal 3D de Cype Ingenieros.
- [13] ThyssenKrupp.
- [14] Euroquímica.
- [15] Kelly, F.S., Sha, W. A Comparison of the Mechanical Properties of Fire-Resistant and S275 Structural Steels. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol 50/3 (1999).